



移动扫码阅读

吴国庆, 马彦龙. 地质透明化工作面内多种异常体的槽波解释方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 149-160.

WU Guoqing, MA Yanlong. Research on the interpretation method of channel waves for various abnormal bodies in geologically transparent working faces[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 149-160.

## 地质透明化工作面内多种异常体的槽波解释方法研究

吴国庆, 马彦龙

(中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 矿井地质透明化是当前煤矿安全高效开采的新要求, 针对复杂地质条件的工作面, 槽波探测技术作为常用的物探手段之一, 若工作面存在多种地质异常体, 其属性无法进行准确的分辨与解释。以山西阳泉某工作面为例, 对包含断层、陷落柱、薄煤带、挠曲 4 种地质异常体的工作面进行了三维波场模拟, 分别从数值模型的单炮特征、频谱特征、频散特征进行分析; 结合数值模型的纵波振幅与速度、横波振幅与速度、高频槽波振幅与速度以及低频槽波振幅与速度 8 种类型的 CT 反演成像, 研究了断层、陷落柱、薄煤带、挠曲 4 种地质异常体在槽波属性上的不同响应特征。结果表明: ①断层引起槽波异常的主频及速度与无地质异常的煤层基本一致, 横波、高频、低频槽波振幅可以显著识别断层, 横波、高频、低频槽波速度可以较显著的识别断层, 纵波振幅与纵波速度无法有效识别断层; ②陷落柱的单炮特征表现为低阶减弱、高阶增强, 横波、高频、低频槽波振幅可以显著识别陷落柱, 横波、高频槽波速度可以较显著的识别陷落柱, 纵波振幅、纵波速度与低频槽波速度无法有效识别陷落柱; ③薄煤带主频基本不变, 速度降低, 高频槽波振幅与速度、低频槽波振幅与速度可以显著识别薄煤带, 纵波速度与横波振幅可以较显著的识别薄煤带, 纵波振幅与横波速度无法有效识别薄煤带; ④挠曲的频谱中振幅增强, 高频槽波振幅与低频槽波振幅可以较显著识别挠曲, 其他槽波属性对挠曲的识别均不明显。根据不同地质异常体在单炮、频散、频谱、波场 CT 成像上的响应特征, 实现了槽波异常的地质识别, 准确解释了各种地质异常体的形态、位置及大小, 为地质透明化工作面的建立奠定了“物质”基础。

**关键词:** 复杂地质; 透明工作面; 槽波属性; CT 反演成像; 异常体识别

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)05-0149-12

### Research on the interpretation method of channel waves for various abnormal bodies in geologically transparent working faces

WU Guoqing, MA Yanlong

(CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The transparency of mine geology is a new requirement for safe and efficient mining of coal mines. For working faces with complex geological conditions, channel wave detection technology is one of the commonly used geophysical prospecting methods. If there are multiple geological anomalies on the working face, its attributes cannot be accurately determined. Distinguish and explain. Taking a working face in Yangquan, Shanxi as an example, a three-dimensional wave field simulation was carried out on a working face including faults, collapsed columns, thin coal belts, and deflection. Analysis of dispersion characteristics; combined with the numerical model of the longitudinal wave amplitude and velocity, shear wave amplitude and velocity, high-frequency groove wave amplitude and velocity, and low-frequency groove wave amplitude and velocity 8 types of CT inversion imaging, the fault, collapse column, thin different response

收稿日期: 2022-04-01 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-1016

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(41974209); 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金资助项目(2018XAYMS15; 2019XAYMS29)

作者简介: 吴国庆(1987—), 男, 陕西合阳人, 助理研究员。E-mail: wuguoqing@cctegxian.com

通讯作者: 马彦龙(1988—), 男, 甘肃甘谷人, 助理研究员。E-mail: mayanlong@cctegxian.com

characteristics of four geological anomalies, coal belt and flexure, on channel wave attributes. The results show that: ①The main frequency and velocity of the channel wave anomaly caused by the fault is basically the same as that of the coal seam without geological anomaly. The amplitude of shear wave, high frequency and low frequency channel wave can significantly identify the fault, and the speed of shear wave, high frequency channel wave and low frequency channel wave can be compared. Significantly identify faults, the longitudinal wave amplitude and longitudinal wave velocity cannot effectively identify the fault; ②The single shot characteristics of the collapsed column are characterized by low-order weakening and high-order enhancement. The amplitude of shear wave, high frequency, and low frequency channel wave can significantly identify the collapsed column, shear wave, and high frequency. The frequency slot wave velocity can identify the collapse column more significantly, while the longitudinal wave amplitude, longitudinal wave velocity and low frequency slot wave velocity cannot effectively identify the collapse column; ③The main frequency of the thin coal belt is basically unchanged, the speed is reduced, the high frequency slot wave amplitude and velocity, low frequency The amplitude and velocity of the channel wave can distinguish thin coal belts, the amplitude of longitudinal wave and transverse wave can distinguish thin coal belts significantly, and the amplitude of longitudinal wave and transverse wave cannot effectively identify thin coal belts; ④The amplitude of the deflection spectrum is enhanced, and the high frequency channel wave amplitude and the low-frequency groove wave amplitude can distinguish the deflection more significantly, and the other properties of the groove wave are not obvious in the recognition of the deflection. According to the response characteristics of different geological anomalies on single shot, frequency dispersion, frequency spectrum and wavefield CT imaging, the geological recognition of channel wave anomalies is realized, and the shape, location and size of various geological anomalies are accurately explained, which is geologically transparent. The establishment of the chemical working face laid the "material" foundation.

**Key words:** complex geology; transparent working surface; groove wave attributes; CT inversion imaging; abnormal body recognition

## 0 引言

在机械化、智能化、透明化工作面采煤生产过程中,对回采工作面前方隐伏的地质异常体进行准确的定性定量解释,可为安全高效采煤提供可靠的地质保障<sup>[1]</sup>。利用物探技术探查隐伏的地质异常体已成为煤矿综合解决地质问题的首选方法<sup>[2]</sup>。近年来,地面全数字高密度三维地震勘探、矿井瞬变电磁勘探、矿井槽波地震勘探及煤矿随采随掘监测<sup>[3-6]</sup>等技术的发展,对透明化工作面地质异常体的识别与解释奠定了基础。矿井槽波地震勘探因其探测距离大、精度高、抗干扰能力强、波形特征易于识别等优点<sup>[7]</sup>,现已成为煤矿解决地质异常体探测的常用方法之一<sup>[8-9]</sup>。

王季等<sup>[10]</sup>应用透射槽波探测技术对3种典型的地质异常体(断层、陷落柱及薄煤带)进行了衰减系数CT成像研究,认为3种地质异常体的衰减系数有一定差异,但成像结果的差异性并不显著;郭银景等<sup>[11]</sup>提出仅用频散、频谱、速度和时频等槽波参数,无法准确判断出断层及其他地质异常体;姬广忠等<sup>[12]</sup>通过断层、煤厚的数值模拟及实际应用,在既有煤厚变化又有断层等构造存在情况下,认为槽波衰减系数成像较难区分构造类型。王伟等<sup>[13]</sup>总结了煤层厚度的变化对槽波频散特征影响,认为煤厚增加、槽波主频降低,同时对应于同一频率波速降低;李松营等<sup>[14]</sup>、崔伟雄等<sup>[15]</sup>分析了基于槽波透射法的采煤工作面煤厚解释技术,煤层厚度变化跟频散关

系密切,较薄的煤层宜选取较高的频率,较厚的煤层宜选取较低频率。综上可知,工作面存在的单个地质异常体可以被准确圈定与解释,对同时存在的多个地质异常进行定性与定量解释还需进一步探讨。

笔者通过理论结合实践综合分析,阳泉矿区<sup>[16-17]</sup>矿井生产工作面发育断层、陷落柱、煤厚变化及挠曲4种地质异常体,且单个工作面包含2种及以上地质异常,在实际资料的解释分析过程中常常会碰到异常体的定性不准确等问题,给矿方回采工作面的方案制定带来很大的困扰,同时也导致无法建立准确的三维地质模型。因此,研究工作面内发育2种及以上地质异常体槽波地球物理响应特征,提出不同地质异常体的槽波地震属性识别方法,建立反演结果与地质异常体的对应关系,形成复杂地质条件下工作面槽波地震解释方法,可进一步提高槽波地震对多种地质异常体的解释水平,为矿方地质透明化工作面回采做好可靠的地质保障。

## 1 多种地质异常体的槽波数值模拟

### 1.1 数值模型空间参数

阳泉矿区15号煤层<sup>[18-19]</sup>平均煤层厚度5.5 m,正演模型设计煤层厚度5 m,顶、底板岩性均为砂岩,厚度20 m。模型大小1 200 m×300 m×45 m,建立了具有三层介质的三维地震地质模型<sup>[20-21]</sup>(图1)。x、y、z方向上对模型进行了大小为1 m×1 m×0.5 m网格化,时间采样间隔为0.05 ms。激发点与接收点测线布置在模型煤层中部,激发间距10 m,进风巷编

号 S11 ~ S110、回风巷 S111 ~ S210, 共计 200 炮; 接收间距 10 m, 进风巷 R11 ~ R110、回风巷 R111 ~ R210, 共计 200 道。物性参数<sup>[22-23]</sup>见表 1, 采用主频 150 Hz 的雷克子波。

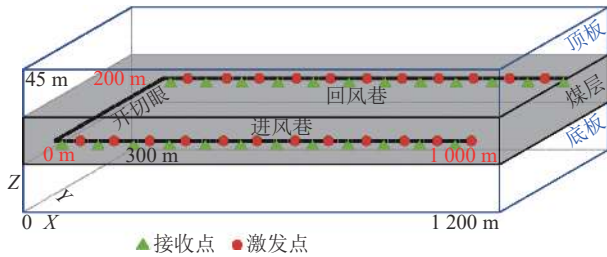


图 1 含观测系统的层状模型

Fig.1 Layered model with observing system

表 1 正演模型物性参数

Table 1 Physical property parameter of forward model

项目	纵波速度 $v_p/(m \cdot s^{-1})$	横波速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$
顶板砂岩	4 000	2 300	2 700
煤	2 200	1 300	1 300
巷道	340	140	1.29
底板砂岩	4 000	2 300	2 700
陷落柱	3 500	1 750	2 300

模拟槽波信号接收选用  $z$  分量检波器, 即接收垂直底板方向的槽波信号, 采用交错网格高阶有限差分法进行弹性波数值模拟<sup>[24-27]</sup>。纵波 (P 波) 与横波 (S 波) 是勒夫 (Love) 型槽波的基本类型, 它是 SH 波干涉形成的, 它的质点是在平行于煤层的平面、垂直于传播方向的平面内作线性极化振动, 是一种纯 SH 波。当其传播过程中遇到弹性分界面或非均匀体时, 将产生反射波、透射波、折射波, 在特殊条件下还可以产生回转波、绕射波等<sup>[28]</sup>。当纵、横波 (P 波、S 波) 在低速夹层中传播时, 由于其干涉, 形成槽波。槽波数据中包含的波场非常复杂, 需要对其进行分析, 分辨出不同类型的波场<sup>[29-31]</sup>。

1.2 不含地质异常体的层状模型数值模拟

以 S3 炮为例, 对  $z$  分量地震记录 (图 2) 进行分析, 最先到达的是来自围岩的折射纵波 ( $v_p=4\ 000\ m/s$ ), 其次是折射横波 ( $v_s=2\ 300\ m/s$ ), 最后到达的较强能量团是煤层中传播的槽波 ( $v=1\ 150\ m/s$ )。槽波是典型的频散波, 即槽波的速度随频率的改变而变化。地震记录中纵、横波振幅相对集中且能量较强, 没有明显的突变点绕射成像, 但存在多次波等波形, 可通过滤波进行处理。

通过 S3 炮  $z$  分量模型数据频散分析<sup>[32-37]</sup> (图 3), 5 m 煤厚的槽波频散曲线能量主要集中在 180 ~

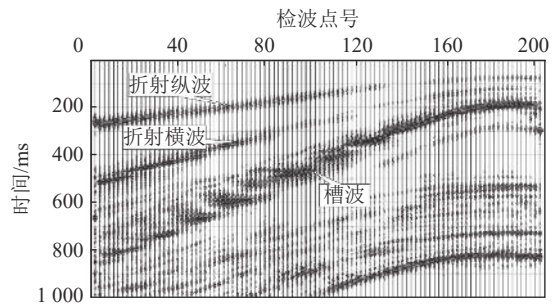


图 2 S3 炮地震记录

Fig.2 Channel wave recording of S3

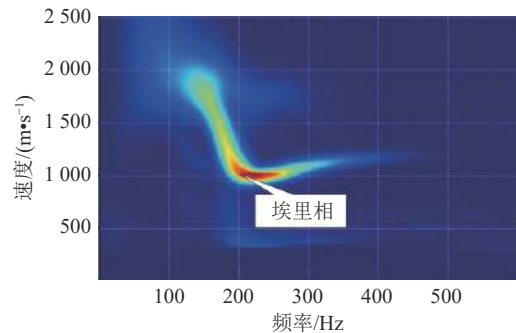


图 3 S3 炮频散曲线

Fig.3 Dispersion curve of S3

210 Hz, 低频槽波 100 ~ 210 Hz、高频槽波 210 ~ 300 Hz, 埃里相群速度为 1 000 ~ 1 200 m/s。

对模型数据进行 150 ~ 180 ~ 210 ~ 250 Hz 的带通滤波, 采用多次滤波计算群速度的方法拾取槽波振幅, 对  $z$  分量进行振幅衰减系数 CT 成像<sup>[38-39]</sup> (图 4), 整个成像区域内槽波振幅没有衰减, 与理论模型相一致, 说明了方法的有效性。

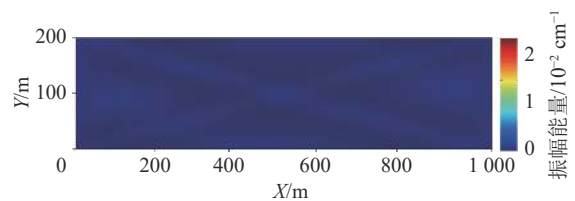


图 4 不含地质异常体的三维层状模型槽波振幅衰减系数 CT 成像

Fig.4 Three-dimensional layered model channel wave CT imaging diagram without geological anomaly

1.3 多种地质异常体的工作面槽波数值模拟

为了研究工作面内多种地质异常体的槽波探测识别方法, 一个工作面设定包含 4 种地质异常体进行三维数值模拟, 不同的地质异常体设定一种代表性的地质参数 (产状、薄厚、尺寸大小、褶幅程度), 从单炮特征、频散特征、CT 成像等结果入手, 在同一个工作面内进行识别研究<sup>[40]</sup>。模型参数见表 2, 三



维数值模型俯视如图 5a 所示,工作面内断层、陷落柱、薄煤带与挠曲的主视如图 5b 所示。

表 2 数值模型参数

Table 2 Numerical model parameter

项目	落差(褶幅)/m	倾角/(°)	夹角/(°)	延伸长度/m	直径/m	厚度/m
断层	2.5	30	60	200	—	—
陷落柱	—	—	—	—	50	—
挠曲	5	45	45	100	—	—
薄煤带	—	—	—	—	100	1.5

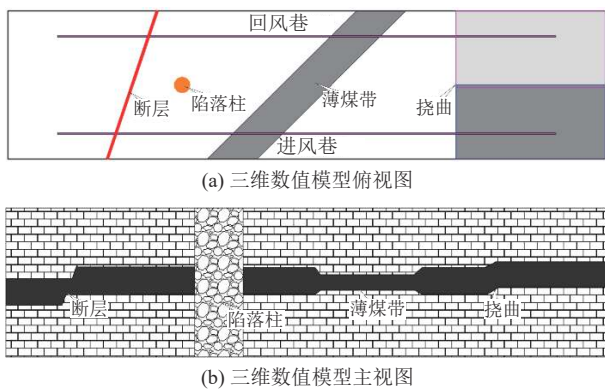


图 5 工作面内多种地质异常体的三维数值模型

Fig.5 Three-dimensional numerical model of various geological anomalies in the working face

对三维数值模型进行正演模拟,从 S9 炮槽波记录(图 6)可以直观看出,断层引起槽波记录的错断、陷落柱影响槽波记录的缺失、薄煤带显示槽波记录分散、挠曲表现为槽波减弱并分散。

从 S9 炮槽波记录频散分析(图 7)可知,槽波振幅主要集中在 100~180 Hz,埃里相群速度 900~1 000 m/s,与不含地质异常体相比较,埃里相群速度与频率均降低。

对数值模拟正演的数据进行振幅衰减系数 CT 成像(图 8),同一个工作面内,4 种地质异常体的成像结果都比较直观,断层表现为明显的条带性异常,陷落柱表现为不规则闭合区域,薄煤带表现出明显的宽条带异常,挠曲表现为无规则的异常区域。实

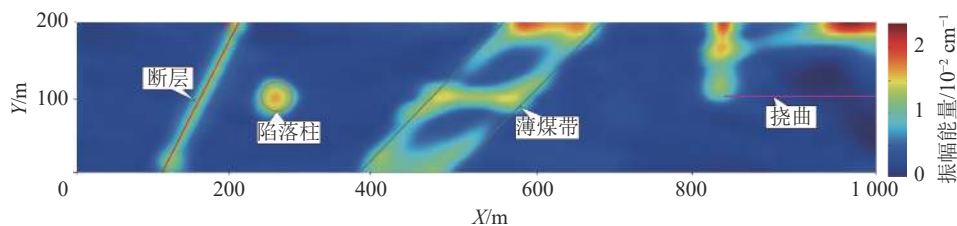


图 8 4 种地质异常的三维层状模型槽波振幅衰减系数 CT 成像

Fig.8 CT imaging of channel wave amplitude attenuation coefficient of three-dimensional layered model of four geological anomalies

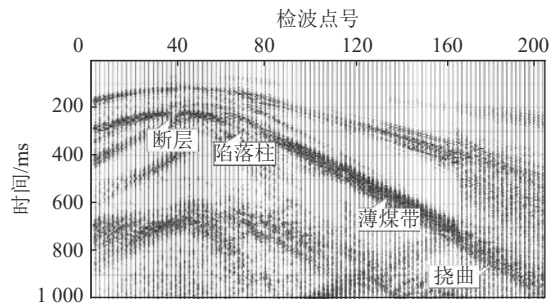


图 6 4 种地质异常体在槽波记录上的显示

Fig.6 The display of four kinds of geological anomalies on channel wave records

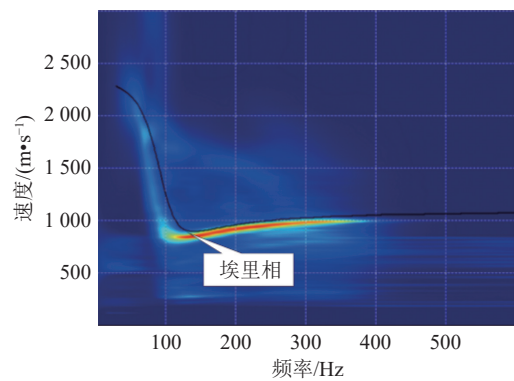


图 7 S9 炮频散曲线

Fig.7 Dispersion curve of S9

际工程应用中,通过对整个工作面的槽波数据反演很难有效地进行槽波异常的定性识别,因此需要进行相应的槽波异常特征分析(单炮、频谱、频散、速度、槽波 CT、横波 CT、纵波 CT),建立多属性的大数据融合,从而实现槽波异常的定性定量识别解释<sup>[41]</sup>。

## 2 多种地质异常体的识别方法

同一个工作面内不同地质异常体的 CT 反演成像结果都比较直观,在地质条件复杂的探测区域,由于受多个异常体的相互影响,仅依据直观的槽波振幅异常无法对地质异常体进行准确定性识别。因此,在保证煤层条件基本一致的前提下,从单炮特征及属性角度出发,对不同地质异常体进行定性识别。识别方法中,主要对不同地质异常体的单炮特征及

多个属性进行对比分析,包括以下5个方面:单炮、频谱、频散、速度、CT成像。

### 2.1 波场特征识别

不同地质异常体单炮特征(图9)对比分析可以

得出以下结论:①地质异常体发育区域内地震记录中的槽波振幅均会发生突变;②断层、陷落柱、薄煤带发育区域,槽波振幅均减弱,纵波及横波振幅有所增强;而挠曲发育区域槽波振幅有所增强。

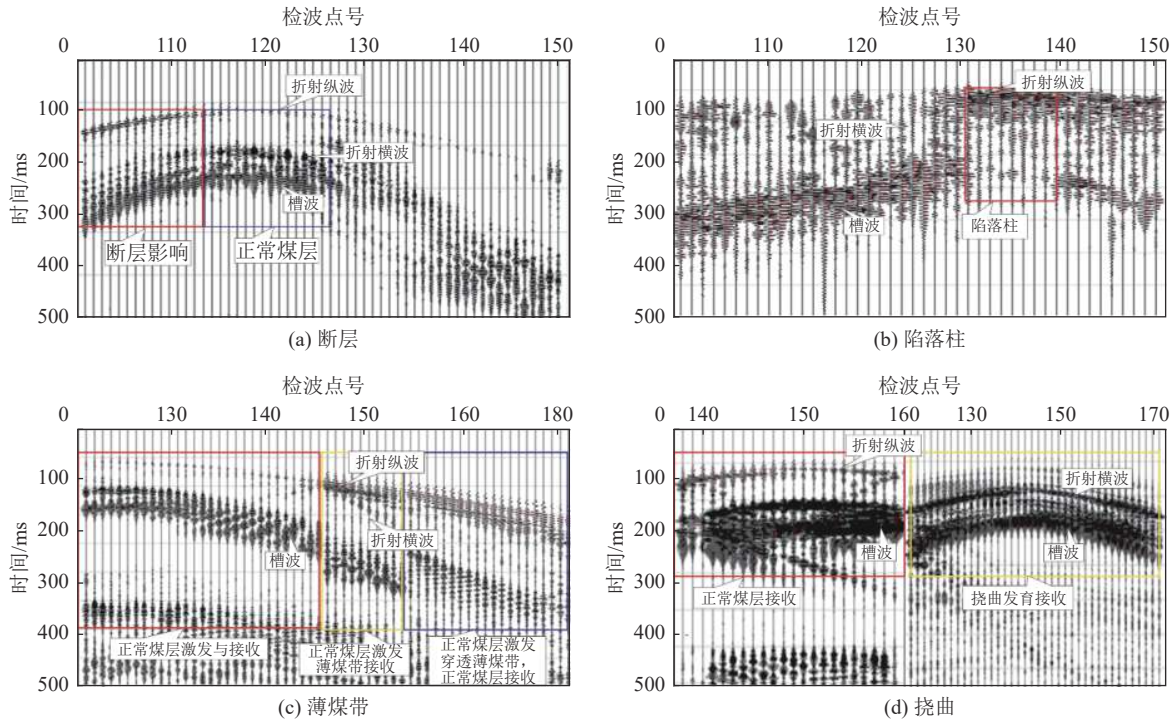


图9 4种地质异常体的波场特征识别

Fig.9 Recognition of wave field characteristics of four geological anomalies

### 2.2 频谱特征识别

不同地质异常体频谱特征对比分析(图10蓝色曲线为窗口全道、红色曲线为窗口中某一单道)可以得出以下结论:①数值模拟频谱特征中,正常煤层的振幅值为最大;断层、陷落柱、正常煤层激发薄煤带接收的振幅值均降低;薄煤带激发并接收振幅值差异不大,能量有所减弱;挠曲振幅值为增强,振幅增强可作为识别挠曲异常的一个必要条件。②薄煤带发育区域内,可分析是否存在正常煤层激发,穿透薄煤带后正常煤层接收的槽波振幅多次衰减特征,频谱中是否存在振幅值多次降低,作为识别薄煤带异常的一个必要条件。

### 2.3 频散、速度特征识别

不同地质异常体频散、速度特征(图11)对比分析可以得出以下结论:①模型数值模拟正常煤层主频为200 Hz、速度1000 m/s;断层主频为200 Hz、速度1000 m/s,低频速度有略微升高;陷落柱主频为180 Hz、低阶速度900 m/s,高阶速度1200 m/s;正常煤层激发薄煤带接收主频为220 Hz、速度700 m/s;薄煤带激发接收主频为220 Hz、速度600 m/s;挠曲

低阶主频为180 Hz,速度600 m/s,高阶主频为220 Hz,速度1100 m/s。②断层与正常煤层的主频及速度近似,但低频速度略微升高,其它地质异常体的主频及速度均与正常煤层差异较大,作为识别断层的一个必要条件。③陷落柱会降低槽波的主频及速度,且低阶和高阶主频相同、速度差异大,作为识别陷落柱的一个必要条件。④薄煤带槽波主频基本不变,速度降低是其最明显的特征,且低阶、高阶的速度差异不大,作为识别薄煤带的一个必要条件。⑤挠曲会降低槽波低阶的主频,高阶主频基本不变,低阶和高阶速度差异大,作为识别挠曲的一个必要条件。

### 2.4 CT成像特征识别

数值模拟中,数据体中最先接收到的是来自顶底板的折射纵波,随后是折射横波,最后到达的是煤层中传播的槽波。CT反演成像中选取振幅、速度2个属性进行成像,由于槽波是频散波,具有多阶模态,因此又将槽波分为低频与高频两大属性分别进行成像。

通过对断层、陷落柱、薄煤带、挠曲4种地质异常体进行相应的纵波振幅、纵波速度、横波振幅、横波速度、高频槽波振幅、高频槽波速度、低频槽波振

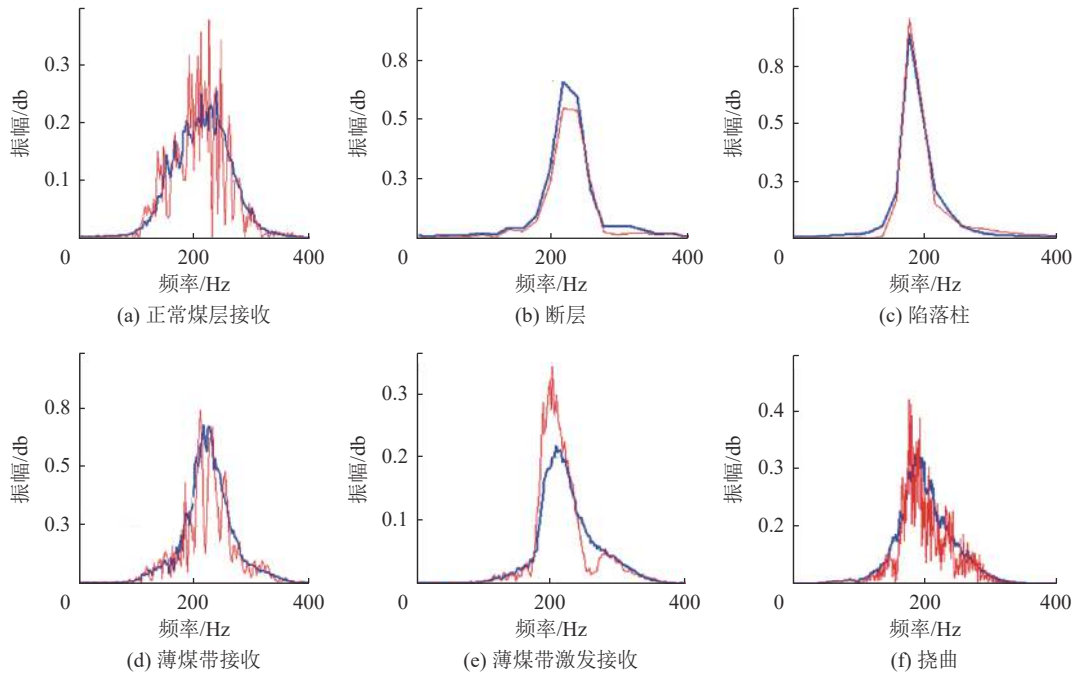


图 10 4 种地质异常体的频谱特征识别

Fig.10 Frequency spectrum feature recognition of four kinds of geological anomalies

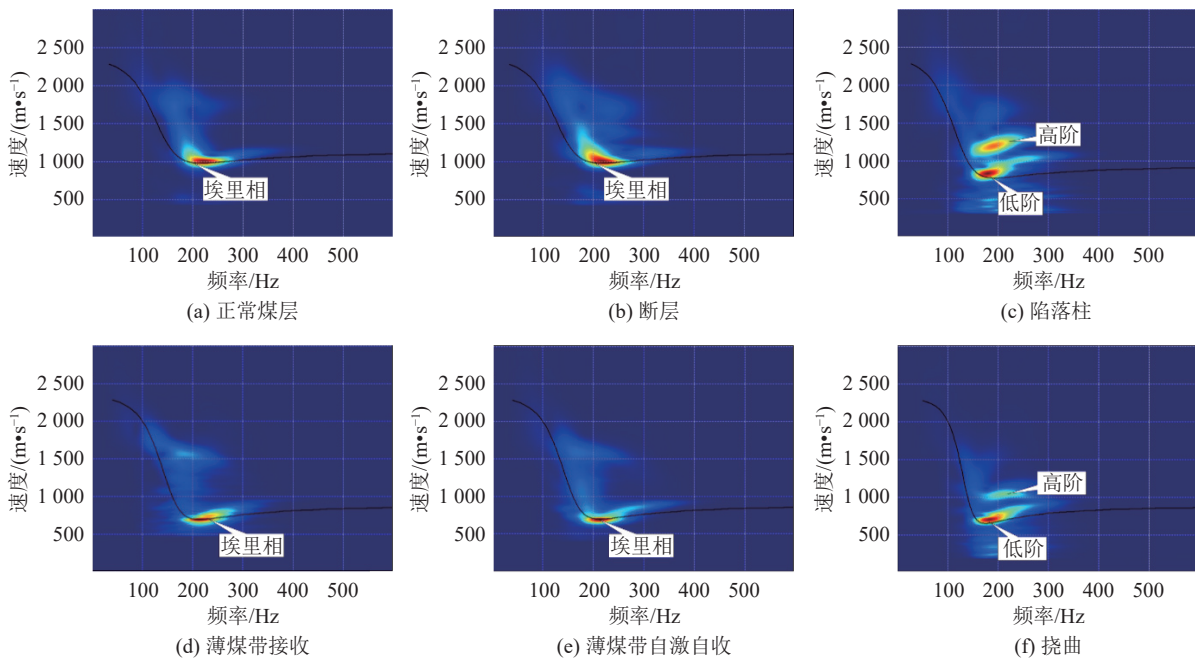


图 11 4 种地质异常体的频散、速度特征

Fig.11 Frequency dispersion and velocity characteristics of four geological anomalies

幅、低频槽波速度 8 种类型的 CT 成像,从不同的成像方法对地质异常体的响应特征进行识别。

### 2.4.1 4 种地质异常体的 CT 成像

1)断层的槽波数值模拟结果:断层会表现出明显的条带性;横波振幅、高频槽波振幅、低频槽波振幅反应显著;横波速度、高频槽波速度、低频槽波速度反应较显著;纵波振幅、速度成像反应不显著(图 12)。

2)陷落柱的槽波数值模拟结果:陷落柱地质异常体会表现出明显的不规则面状异常;横波振幅、高频槽波振幅、低频槽波振幅反应显著;横波速度、高频槽波速度反应较显著;纵波振幅、速度成像、低频槽波速度成像反应不显著;横波振幅成像反应为边界异常,陷落柱中心为正常区域的不规则环状异常(图 13)。



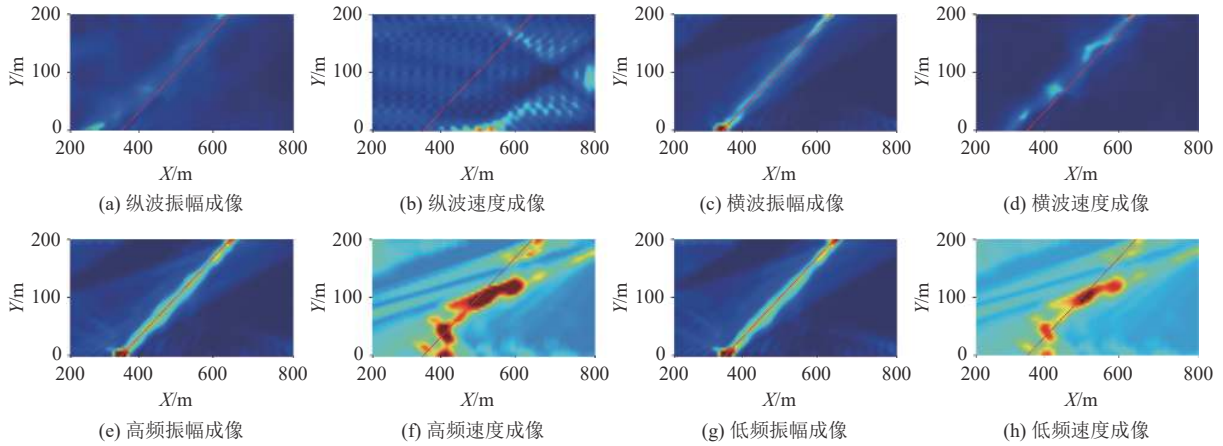


图 12 断层的多种属性 CT 成像响应特征

Fig.12 CT imaging response characteristics of multiple attributes of fault

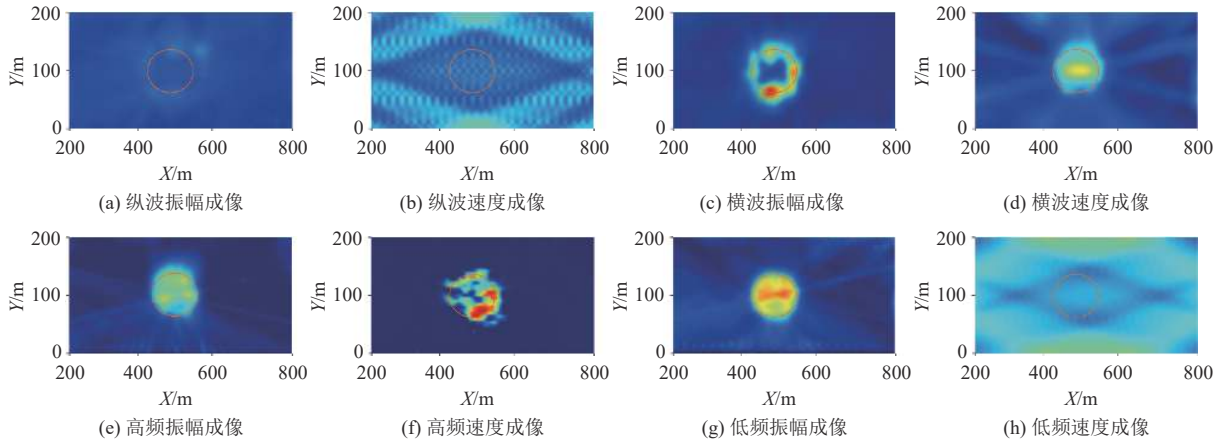


图 13 陷落柱的多种属性 CT 成像响应特征

Fig.13 CT imaging response characteristics of multiple attributes of collapse column

3)薄煤带的槽波数值模拟结果:薄煤带地质异常体会表现出明显的宽带状异常;高低频槽波速度、振幅成像均对薄煤带反射均显著,但低频速度成像的条带性更好,边界明显;纵波速度、横波振幅成像反应较显著;纵波振幅、横波速度成像反应不显著(图 14)。

4)挠曲的槽波数值模拟结果:仅有高低频槽波振幅对挠曲异常有一定的反应,且仅对挠曲褶轴有相应的反应(图 15)。

### 2.4.2 地质异常体 CT 成像识别

纵波、横波、槽波的 CT 反演方法对不同地质异常体反映不同,联合多种成像方法可以对地质异常体进行识别(表 3)。

1)结合 CT 成像结果,横波、高频槽波、低频槽波振幅成像可以作为断层识别的一个必要条件,成像特征显著。

2)横波、高频槽波、低频槽波振幅成像可以作为

陷落柱识别的一个必要条件,成像特征显著。

3)高、低频槽波振幅、速度成像可以作为薄煤带识别的一个必要条件,成像特征显著。

4)高、低频槽波振幅成像可以作为挠曲识别的一个必要条件,成像特征较显著。

## 3 实例分析

### 3.1 施工设计与数据采集

阳泉矿区某工作面为一次性采全高综采面,探测区域内煤层总体呈东北高西南低的单斜构造,探测走向长度 800 m,倾向宽度 200 m,钻孔揭露煤层厚度 4.91 m。根据探测区域内现有地质资料,断层、陷落柱、薄煤带、挠曲均比较发育。顶板为砂岩或泥质砂岩,局部为中、细粒砂岩;底板为砂岩,局部为粉砂岩或细粒砂岩。

本次槽波试验结合正演模拟确定测线沿进风巷、回风巷内侧帮布置,如图 16 所示。

1)接收点布置 道距 10 m,共设计接收点 142 个。

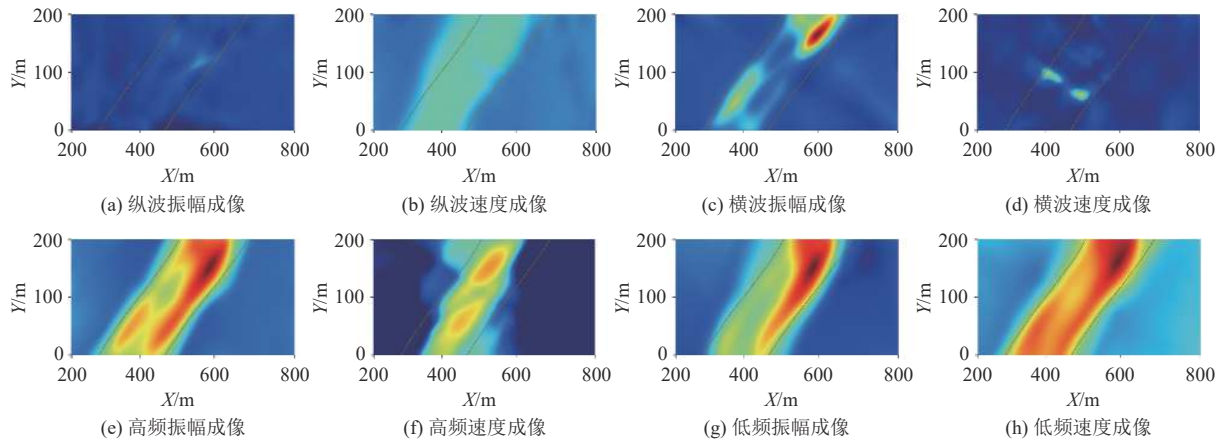


图 14 薄煤带的多种属性 CT 成像响应特征

Fig.14 CT imaging response characteristics of multiple attributes of thin coal belt

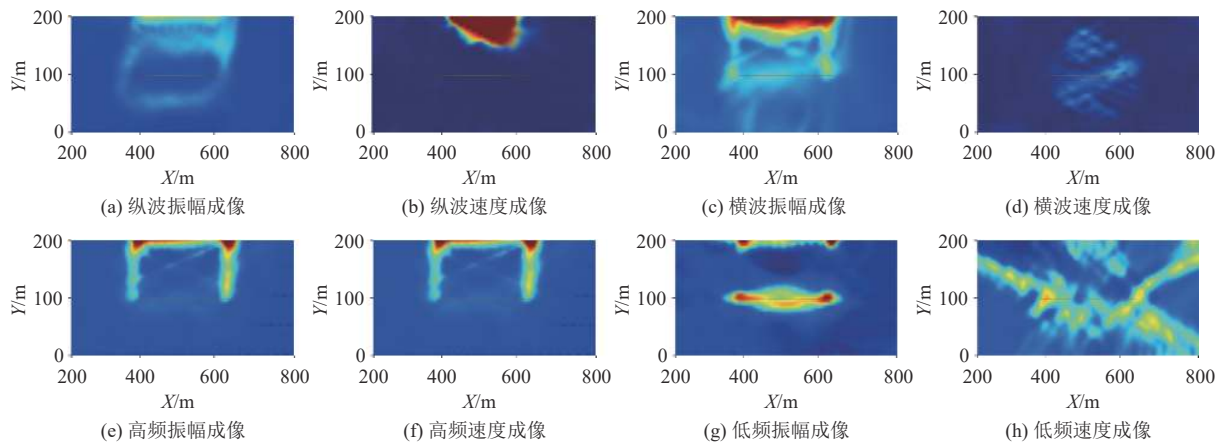


图 15 挠曲的多种属性 CT 成像响应特征

Fig.15 CT imaging response characteristics of multiple attributes of flex

表 3 不同地质异常体多种类型 CT 成像响应特征

Table 3 Response characteristics of various types of CT imaging of different geological anomalies

CT成像方法异常体	断层	陷落柱	薄煤带	挠曲
纵波振幅	不显著	不显著	不显著	不显著
纵波速度	不显著	不显著	较显著	不显著
横波振幅	显著	显著	较显著	不显著
横波速度	较显著	较显著	不显著	不显著
高频槽波振幅	显著	显著	显著	较显著
高频槽波速度	较显著	较显著	显著	不显著
低频槽波振幅	显著	显著	显著	较显著
低频槽波速度	较显著	不显著	显著	不显著

2) 激发点布置 炮距 20 m, 共设计激发物理点 72 个, 孔深 3 m, 孔径 42 mm, 单孔药量为 300 g。

### 3.2 工作面异常体分析

对槽波数据进行预处理, 包括数据编辑、建立观测系统、振幅扩散补偿等, 分别从单炮、频谱、频散速度、CT 成像特征, 列举针对性的槽波记录对地质

异常体进行识别解释。

#### 3.2.1 断层

从 S20 炮槽波记录(图 17a)可以看出断层引起了槽波振幅的减弱及缺失, 纵横波振幅增强; 频谱振幅降低(图 17b); 结合正演模拟, 主频与速度跟无构造异常煤层基本一致(图 17c)。



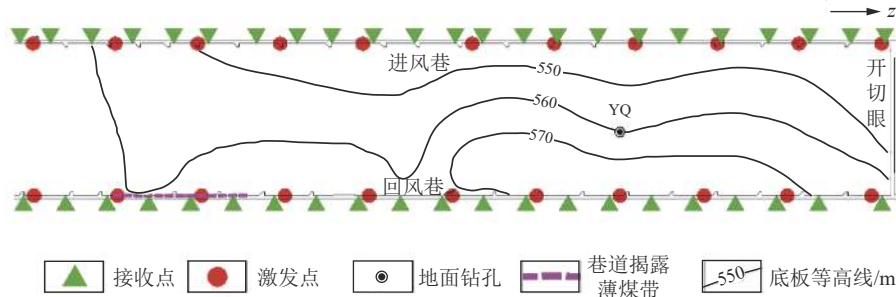


图 16 施工布置

Fig.16 Construction layout

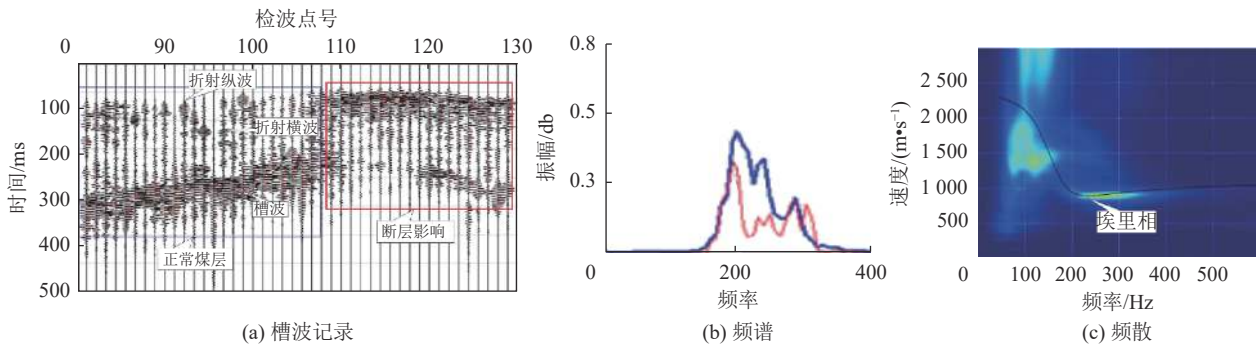


图 17 槽波属性断层识别

Fig.17 Fault recognition of channel wave attribute

3.2.2 陷落柱

从 S30 炮槽波记录(图 18a)可以看出陷落柱引起了槽波振幅的缺失、折射波振幅增强;频谱中,槽

波通过陷落柱异常后振幅减弱(图 18b);频散速度分析中埃里相变化明显,主要特征为低阶主频降低,高阶增强(图 18c)。

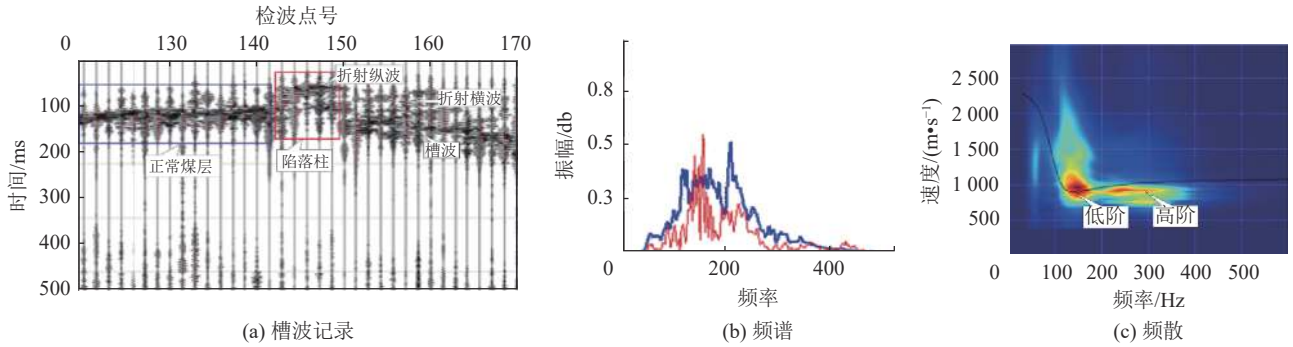


图 18 槽波属性陷落柱识别

Fig.18 Collapse column recognition of channel wave attribute

3.2.3 薄煤带

从 S10 炮槽波记录(图 19a)可以看出薄煤带引起了槽波振幅的部分衰减;频谱特征中,高频成分衰减比低频成分衰减要明显,正常煤层激发,穿透薄煤带后正常煤层接收,振幅减弱最大(图 19b);频散特征中,正常煤层激发,遇到薄煤带后,主频增加(图 19c)。

波振幅影响较小,振幅反而有一定增强(图 20b);频散速度分析中高阶主频基本不变,低阶和高阶速度差异大(图 20c)。

3.3 成像成果解释

结合多种地质异常体数值模拟总结的识别方法,通过单炮、频谱、频散特征对实际资料的综合分析,选择对断层、陷落柱、薄煤带均能显著识别、挠曲较显著识别的低频、高频槽波振幅进行 CT 成像,最后形成综合的槽波解释成果(图 21)。

3.2.4 挠曲

从 S50 炮槽波记录(图 20a)可以看出挠曲对槽

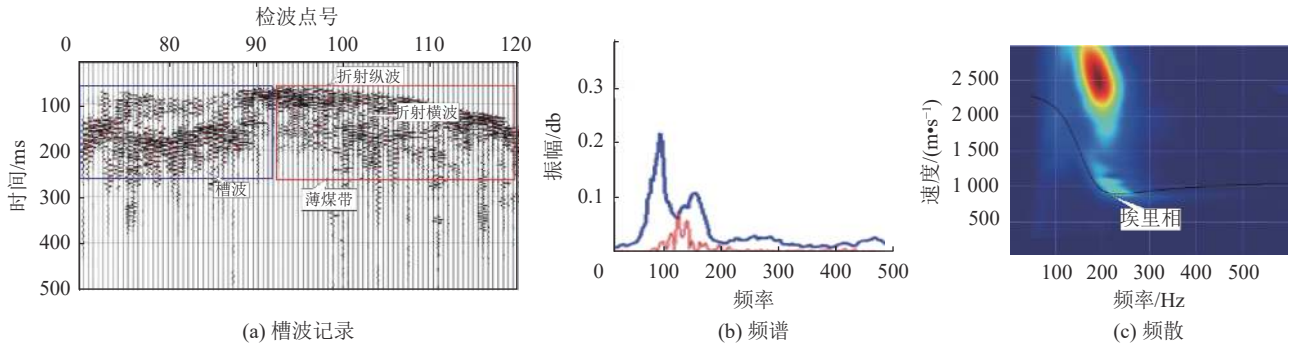


图 19 槽波属性薄煤带识别

Fig.19 Thin coal belt column recognition of channel wave attribute

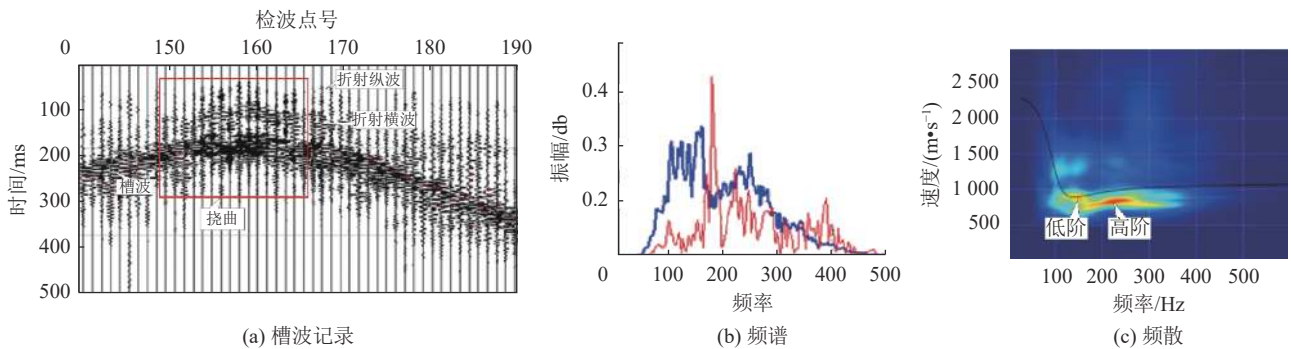


图 20 槽波属性挠曲识别

Fig.20 Flex recognition of channel wave attribute

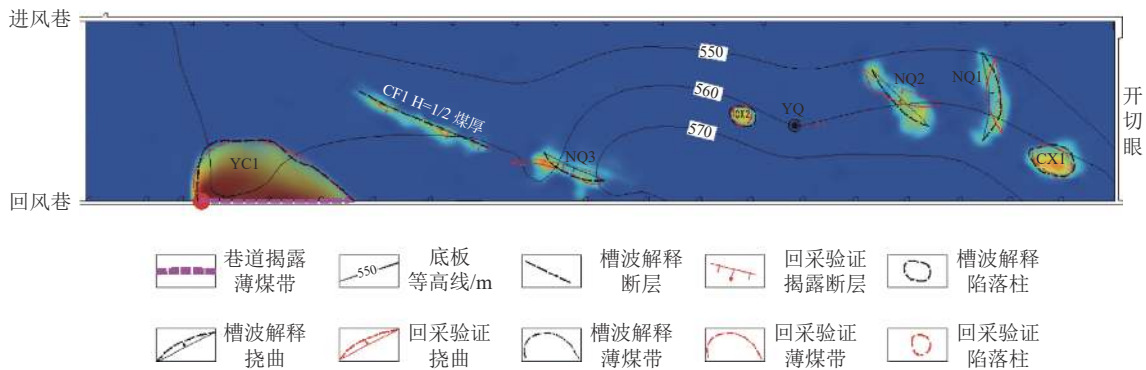


图 21 槽波探测解释成果对比

Fig.21 Comparison of channel wave detection and interpretation results

根据工作面回采写实,槽波解释的断层(CF1)、陷落柱(CX1、CX2)、挠曲(NQ1、NQ2、NQ3)与薄煤带范围(YC1)均与实际揭露吻合较高。

#### 4 结 论

1)单炮特征:断层、陷落柱、薄煤带导致槽波振幅均有明显减弱且纵波、横波振幅有所增强,挠曲引起了槽波振幅的增强。

2)频谱特征:断层及陷落柱对槽波振幅的衰减是一次性且衰减明显,薄煤带对槽波振幅的衰减具有多次性,挠曲因煤层连续性未经破坏,振幅衰减变

化不明显。

3)频散特征:断层与正常煤层的主频及速度相近,陷落柱会降低槽波的主频及速度,且低阶和高阶主频相同、速度差异大,薄煤带主频基本不变,速度降低且低阶、高阶的速度差异小;挠曲会降低槽波低阶主频,高阶主频基本不变,低阶和高阶速度差异大。

4)波场 CT 成像:横波、高频槽波、低频槽波振幅成像对断层反映显著,断层表现出明显的条带状;横波、高频槽波、低频槽波振幅成像对陷落柱反映显著,陷落柱表现出明显的不规则面状异常;高低频槽波振幅、速度成像对薄煤带反映显著,薄煤带表现出

明显的宽带状异常;高低频槽波振幅成像对挠曲反应较显著,挠曲表现为无规则的异常区域。

#### 参考文献(References):

- [1] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2331-2345.  
PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2331-2345.
- [2] 程建远, 王保利, 范涛, 等. 煤矿地质透明化典型应用场景及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 1-12.  
CHENG Jianyuan, WANG Baoli, FAN Tao, *et al.* Typical application scenes and key technologies of coal mine geological transparency[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 1-12.
- [3] 袁亮, 张平松. 煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2277-2284.  
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Development status and prospect of geological guarantee technology for precise coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2277-2284.
- [4] 程建远, 聂爱兰, 张鹏. 煤炭物探技术的主要进展及发展趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(6): 136-141.  
CHENG Jianyuan, NIE Ailan, ZHANG Peng. Outstanding progress and development trend of coal geophysics[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(6): 136-141.
- [5] 薛国强, 李貅, 戚志鹏, 等. 瞬变电磁拟地震子波宽度压缩研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1384-1390.  
XUE Guoqiang, LI Xiu, QI Zhipeng, *et al.* Study of sharpening the TEM pseudo-seismic wave-form[J]. Chinese Journal Geophysics, 2011, 54(5): 1384-1390.
- [6] 陆斌, 程建远, 胡继武, 等. 采煤机震源有效信号提取及初步应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2202-2207.  
LU Bin, CHENG Jianyuan, HU Jiwu, *et al.* Shearer source signal extraction and preliminary application[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2202-2207.
- [7] 胡国泽, 滕吉文, 皮娇龙, 等. 井下槽波地震勘探: 预防煤矿灾害的一种地球物理方法[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 439-451.  
HU Guoze, TENG Jiwen, PI Jiaolong, *et al.* In-seam seismic exploration techniques: a geophysical method predicting coal mine disaster[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 439-451.
- [8] YANG Z, GE M C, WANG S G. Characteristics of transmitting channel wave in a coal seam[J]. Mining Science and Technology, 2009(19): 331-333.
- [9] 刘天放, 潘冬明, 李德春, 等. 槽波地震勘探[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [10] 王季, 李刚, 吴国庆, 等. 采煤工作面地质异常体透射槽波探测技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 159-163, 193.  
WANG Ji, LI Gang, WU Guoqing, *et al.* Transmitted channel wave detecting technology of geologic anomalous body in coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 159-163, 193.
- [11] 郭银景, 巨媛媛, 范晓静, 等. 槽波地震勘探研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(2): 216-227.  
GUO Yinjing, JU Yuanyuan, FAN Xiaojing, *et al.* Progress in research of in-seam seismic exploration[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(2): 216-227.
- [12] 姬广忠, 程建远, 胡继武, 等. 槽波衰减系数成像方法及其应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S2): 471-475.  
JI Guangzhong, CHENG Jianyuan, HU Jiwu, *et al.* In-seam wave imaging using attenuation coefficient: method and application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 471-475.
- [13] 王伟, 高星, 李松营, 等. 槽波层析成像方法在煤田勘探中的应用: 以河南义马矿区为例. 地球物理学报, 2012, 55(3): 1054-1062.  
WANG Wei, GAO Xing, LI Songying, *et al.* Channel wave tomography method and its application in coal mine exploration: An example from Henan Yima Mining Area[J]. Chinese J Geophys (in Chinese), 2012, 55(3): 1054-1062.
- [14] 李松营, 廉洁, 滕吉文, 等. 基于槽波透射法的采煤工作面煤厚解释技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 719-725.  
LI Songying, LIAN Jie, TENG Jiwen, *et al.* Interpretation technology of coal seam thickness in mining face by ISS transmission method[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 719-725.
- [15] 崔伟雄, 王保利, 王云宏. 基于透射槽波的工作面煤层厚度高精度反演方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2482-2490.  
CUI Weixiong, WANG Baoli, WANG Yunhong. High-precision inversion method of coal seam thickness based on transmission channel wave[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2482-2490.
- [16] 王一, 张会青, 刘培宏. 阳泉矿区3号煤层瓦斯地质特征和煤与瓦斯预测[C]//中国煤炭学会瓦斯地质专业委员会第三次全国瓦斯地质学术研讨会, 2003: 9-20.
- [17] 刘最亮, 冯梅梅. 阳泉矿区新景矿构造煤发育规律的数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 35-43.  
LIU Zuiliang, FENG Meimei. Numerical simulation study on the development patterns of tectonically deformed coal in Xinjing coal mine in Yangquan[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 35-43.
- [18] 李成. 阳泉矿区陷落柱分布特征与褶皱、断层及地震的关系探讨[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.  
LI Cheng. Study on the distributing characteristics of karst collapse pillars in Yangquan mining area and its relationship with folds, faults and seismicity[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [19] 令狐建设, 闫志铭, 徐超. 阳泉矿区差异地质构造对煤体突出物性参数的影响[J]. 煤矿安全, 2020, 51(9): 20-23, 29.  
LINGHU Jianshe, YAN Zhiming, XU Chao. Influence of different geological structures in Yangquan Mining Area on outburst-related physical parameters of coal[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(9): 20-23, 29.
- [20] 吴志春, 郭福生, 林子瑜, 等. 三维地质建模中的多源数据融合技术与方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版)2016, 46(6): 1895-1913.  
WU Zhichun, GUO Fusheng, LIN Ziyu, *et al.* Technology and method of multi-data merging in 3D geological modeling[J].



- Journal of Jilin University(Earth Science Edition)2016, 46(6): 1895-1913.
- [21] 孙振明,毛善君,祁和刚,等.煤矿三维地质模型动态修正关键技术[J].煤炭学报,2014,39(5):918-924.  
SUN Zhenming, MAO Shanjun, QI Hegang, *et al.* Dynamic correction of coal mine three-dimensional geological model[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 918-924.
- [22] YANG X. H, CAO Siyuan, LI Dechun, *et al.* Analysis of quality factors for Rayleigh channel waves[J]. *Applied Geophysics*, 2014, 11(1): 107-114.
- [23] KATJA E, THOMAS B, WOLFGANG F, *et al.* Modelling of Rayleigh-type seam waves in disturbed coal seams and around a coal mine roadway[J]. *Geophys. J. Int.*, 2007, 170: 511-526.
- [24] 刘盛东,余森林,王 勃,等.矿井巷道地震反射波超前探测波场处理方法研究[J].煤炭科学技术,2015,43(1):100-103.  
LIU Shengdong, YU Senlin, WANG Bo, *et al.* Study on processing method of seismic reflection wavefield for advanced detection of mine gateway[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(1): 100-103.
- [25] 姬广忠,程建远,朱培民,等.煤矿井下槽波三维数值模拟及频散分析[J].地球物理学报,2012,55(2):645-654.  
JI Guangzhong, CHENG Jianyuan, ZHU Peimin, *et al.* 3-D numerical simulation and dispersion analysis of in-seam wave in underground coal mine[J]. *Chinese Journal Geophysics(in Chinese)*, 2012, 55(2): 645-654.
- [26] ZHANG J H, WANG S Q, YAO Z X. Accelerating 3D Fourier migration with graphics processing units[J]. *Geophysics*, 2009, 74(6): 129-139.
- [27] LIN JCR, WEI K. Interactive 3D seismic-attribute volume generation with parallel graphics hardware[C]//SEG, 2007: 907-911.
- [28] 杨思通,程久龙.煤巷地震超前探测数值模拟及波场特征研究[J].煤炭学报,2010,35(10):1633-1637.  
YANG Sitong, CHENG Jiulong. Numerical simulation of fore detecting with seismic in coal roadway and study of wave field characteristics[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(10): 1633-1637.
- [29] 杨思通.矿井巷道地震超前探测三维全波场数值模拟与探测方法研究[D].济南:山东科技大学,2011.  
YANG Sitong. 3D full wavefield numerical simulation of seismic advanced detection in coal roadway and study of detection method[D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [30] 朱光明,李桂花,程建远.煤矿巷道内地震勘探的数值模拟[J].煤炭学报,2008,33(11):1263-1267.  
ZHU Guangming, LI Guihua, CHENG Jianyuan. Numerical simulation of seismic survey in coal mine roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(11): 1263-1267.
- [31] 张平松,李圣林,郭立全.矿井随掘地震震源时间函数及其模拟数据脉冲化处理研究[J].煤炭科学技术,2023,51(1):361-368.  
ZHANG Pingsong, LI Shenglin, GUO Liquan. Study on time function of seismic source and numerical simulation data impulse processing of seismic while driving in mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 361-368.
- [32] 程建远,姬广忠,朱培民.典型含煤模型Love型槽波的频散特征分析[J].煤炭学报,2012,37(1):67-72.  
CHENG Jianyuan, JI Guangzhong, ZHU Peimin. Love channel-waves dispersion characteristic analysis of typical coal models[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(1): 67-72.
- [33] 杨小慧,李德春,于鹏飞.煤层中瑞利型槽波的频散特性[J].物探与化探,2010,34(6):750-752.  
YANG Xiaohui, LI Dechun, YU Pengfei. Dispersion characteristics of Rayleigh-type groove waves in coal seams[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 34(6): 750-752.
- [34] 钱建伟,李德春. Love 型槽波的基本特性研究[J].中国煤炭地质,2013,25(9):52-54.  
QIAN Jianwei, LI Dechun. A study on Love mode channel wave basic characteristics[J]. *Coal Geology of China*, 2013, 25(9): 52-54.
- [35] 毛明仓,张孝斌,张玉良.基于透明地质大数据智能精准开采技术研究[J].煤炭科学技术,2021,49(1):286-293.  
MAO Mingcang, ZHANG Xiaobin, ZHANG Yuliang. Research on intelligent and precision mining technology based on transparent geological big data[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 286-293.
- [36] GERSZTENKORN A, SCALES J A. Smoothing seismic tomograms with alpha-trimmed means[J]. *Geophysical Journal International*, 1988, 2(1): 67-72.
- [37] 乔勇虎,滕吉文.煤层厚度变化时地震槽波理论频散曲线计算方法及频散特征分析[J].地球物理学报,2018,61(8):3374-3384.  
QIAO Yonghu, TENG Jiwen. Calculation method for theoretical dispersion curves of seismic channel waves considering variation of coal seam thickness and analysis of dispersion characteristics[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(8): 3374-3384.
- [38] LI X, SCHOTT W, Rüter H. Frequency-dependent Q-estimation of Love-type channel waves and the application of Gkorrection to seismograms[J]. *Geophysics*, 1995, 60(6): 1773-1789.
- [39] 王 季,李建政,吴 海,等.透射槽波振幅衰减系数成像与陷落柱探测[J].煤炭科学技术,2015,43(1):108-111.  
WANG Ji, LI Jianzheng, WU Hai, *et al.* Tomography of transmission in-seam wave attenuation coefficient and detection of collapse columns[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(1): 108-111.
- [40] 乐 勇,王 伟,申青春,等.槽波地震勘探技术在工作面小构造探测中的应用[J].煤田地质与勘探,2013,41(4):74-77.  
LE Yong, WANG Wei, SHEN Qingchun, *et al.* Application of ISS in detection of small structures in working face[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2013, 41(4): 74-77.
- [41] 苏晓云.我国主要矿区典型煤层槽波赋存发育特征研究[J].煤炭工程,2020,52(10):137-142.  
SU Xiaoyun. The occurrence and development characteristics of channel wave in main mining areas of China[J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(10): 137-142.